基于行星际闪烁（IPS）望远镜的数字波束合成技术研究

杨 轩[1,2]，陈林杰[2]，荣健[1]，颜毅华[2,3]

(1.电子科技大学 四川 成都 610066； 2.中科院国家天文台 北京 100101；3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要：对于拟建设的子午工程二期中的明安图行星际闪烁望远镜，数字波束合成技术是其中的一项关键技术。针对现有数字波束合成算法无法满足IPS望远镜上的应用需求和复杂度较高，本文对现有的数字波束合成算法进行了改进和优化，提出了一种适应于明安图IPS望远镜的波束合成算法，仿真结果显示该算法能够很好地满足IPS望远镜的需求。同时，在单个波束的基础上，本文也提出了多波束合成的算法，并进行了算法的仿真。

关键词：行星际闪烁(IPS)望远镜； 数字波束合成算法； 线性约束最小方差(LCMV)算法

中图分类号：P161.1 **文献标识码：** **文章编号：**

0 引 言

国家重大科研装备研制项目子午工程二期列入了国家发改委十大优先支持项目，该工程连续监测地球表面20km-30km以上到几百公里的高层大气、电离层和磁层以及十几个地球半径以外的行星际空间环境中的电磁场、电场、中高层大气的风场、密度和成分、电离层、磁层和行星际空间的有关参数。

行星际闪烁（Interplanetary Scintillation: IPS）是指来自于遥远致密射电源的电磁波在穿过太阳系行星际空间时，被太阳风等离子散射形成的射电波强度和相位的一种随机起伏现象。通过研究这种闪烁现象，就可以研究致密源的角结构，并测量太阳风速度和太阳风等离子不规则结构，观测数据对理论研究和实际应用都有重要作用[1]。行星际闪烁的地基测量是监测行星际空间的一种经济、有效的遥感技术。以天然射电源或卫星下行通讯链为射电信标，以地基望远镜的单站或多站组网方式接收射电信号，行星际空间作为射电传播路径的介质能影响射电的传播特性。通过对该透射的射电的信号强度、传播时延、相位变化等参量的测量，必要时加以反演计算，可以遥测行星际空间的结构及其时空变化特征。

目前，国外多个国家已经利用现有望远镜开展了对行星际闪烁的研究，国内由中科院空间中心牵头建设的子午二期行星际闪烁观测设备目前正在进行技术储备，其通过三站联合观测，并分析数据，有望在背景太阳风速的三维大尺度分布和太阳活动周演化、行星际CME的三维空间层析反演和时变追踪、太阳风的动理学湍流幅度等方面取得重要科学进展[2]。

对于行星际闪烁（IPS）望远镜，其中的一个关键技术是数字多波束合成技术。 [1]

数字多波束合成亦称空域滤波器，是阵列处理的一个主要技术。目前，它在射电天文，雷达、声呐、导航、无线电通信和地震监测等诸多方面都得到了广泛的应用。本文主要讨论其在射电望远镜上的应用。数字多波束合成实质是充分利用天线阵列在不同位置的阵元所获得的空

*基金项目：国家自然科学基金项目(11573043,11790305,11433006)资助.
收稿日期：2019-07-10 修订日期：
作者简介：杨轩，男，硕士， 研究方向：射电天文技术， Email:xuanyang24@nao.cas.cn

间信号信息，通过对各阵元进行加权，来达到增强期望信号、抑制干扰的目的。其优点有：可形成单个或多个独立可控的波束而不损失信噪比；波束特性由权矢量控制，灵活多变；天线具有较好的自校正和低旁瓣能力；方便后续进行阵列信号处理，以获得优良性能[2]。利用这一技术可形成多个主波束，实现对天空多个射电源同时进行观测。

1 行星际闪烁（IPS）望远镜

在子午二期行星际闪烁望远镜的设计中，分析比较日本Nagoya四站和印度Ooty单站的IPS设计方案和观测经验，我们提出了新的“一主站两辅站”的望远镜设计方案。其主站位于内蒙古正镶白旗明安图镇，采用大型可转动的抛物柱面天线；两辅站分别位于阿巴嘎和克什克腾，采用全可动的抛物面天线。该三站的地理坐标近似构成“等边三角形”，其任两站之间的基线长度近似200公里。IPS探测设备主要是测量射电源强度闪烁的时间序列，采用单台站观测的功率谱拟合和三台站联测的互相关时延，快速获得不同空间区域处太阳风的速度、电子密度扰动的非约化功率谱等物理参数，追踪太阳风和CME扰动在行星际空间的加速、传播和演变。

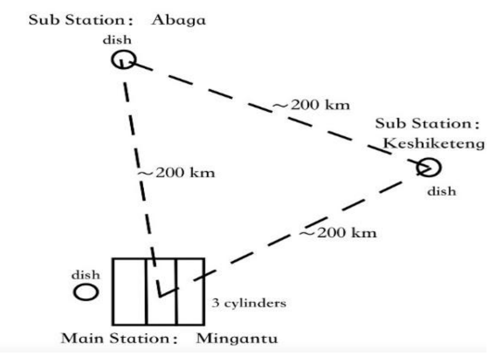


图1　IPS望远镜的布局

Fig.1 Configuration of the IPS Telescope

子午二期IPS望远镜三个站点中的主站由三个抛物柱面天线并排放置，每个柱面天线在南北（N-S）方向上的尺寸为140米，在东西（E-W）方向上的尺寸为40米，如图2所示。为了快速扫描天空和寻找其他科学目标，柱面天线被设计成可以在E-W方向转动，但不跟踪天空中的源。通过转动，在不同的时间指向不同的天区，可以完成整个天区的快速扫描覆盖。另外，在主站还有一个20米的抛物面天线，也可以用于IPS的观测。两个辅站各有一个约20米的抛物面天线。

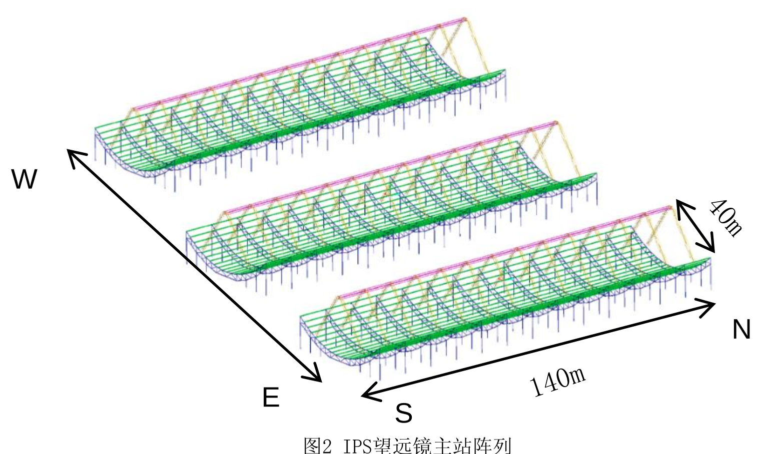


图2 IPS望远镜主站阵列

Fig.2 main site array of IPS Telescope

在每个站点，天线不仅可以双频率单站点独立地观测射电源，而且也可以双频率多站点联合工作。通过这种方式，一方面可以利用主站的天线获得很高的灵敏度，观测到天空中更多的射电源，另一方面还可以利用对强射电源进行多站相关来获得更为精确的太阳风速度等信息，从而更好地重建三维太阳风结构。

每个柱面天线有一个聚焦线，沿着聚焦线放置304个馈源接收射电信号，可以在327MHz和654MHz下同时或是单独工作。每个馈源连接着一个低噪声放大器（LNA），信号经放大、带通滤波后经过一个AD转换器进行数字化。数字信号通过光纤传输到室内接收机，然后进行数字多波束合成，最后输出不同方向多个射电源的观测信号。本文主要是对IPS望远镜主站柱面天线的数字多波束合成技术进行研究[3]。IPS望远镜阵列的主要参数和技术指标如表1所示。

表1 IPS望远镜阵列的主要参数和技术指标

Tab.1 Main Specifications and technical indicators of IPS Telescope array

天线	柱面天线：3×140m×40m
	抛物面天线：1×20m和2×~20m
频率	327MHz,654MHz,1420MHz*
频率带宽	40MHZ
频率分辨率	39KHZ
合成波束	主站：3*12个，旁瓣低于-20dB
灵敏度	主站：~4.4mJy ， 子站：~261mJy

(*)仅辅站抛物面天线在此频率观测

2 阵列信号的建模

假设空间有一个射电源，且有N个阵元组成的均匀线阵阵列来接收信号。将第一个阵元位于坐标原点，作为参考阵元。在信号是窄带的情况下，若参考阵元接收的信号用 $S(t)=s(t)e^{jwt}$ 表示，则第i个阵元接收的信号可以表示为 $S_i(t)=s(t-t_i)e^{jwt}e^{-jwt_i}$ 。均匀线阵接收信号模型如图4所示。

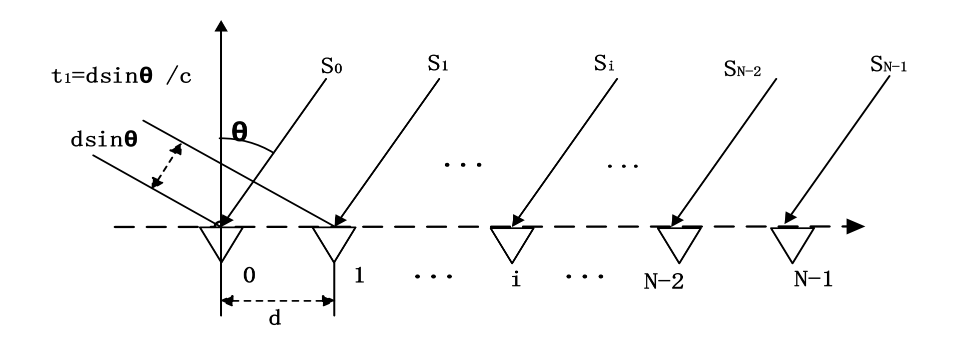


图4 均匀线阵接收信号模型

Fig. 4 Received signal model of uniform linear array

我们设 $a(\theta)$ 为导向矢量，则 $a(\theta)=\left[1,e^{-jwt_1},...,e^{-jwt_i},...,e^{-jwt_{N-2}},e^{-jwt_{N-1}}\right]^T$, 其中第i个阵元相对于参考阵元的延时 $t_i=id\sin\theta/c$ 。

干扰和期望信号为同频率的窄带信号，但入射角度不同，且与期望信号不相关。

噪声信号为平稳的、零均值、方差为 σ^2 的高斯白噪声，并且各阵元接收的噪声间互不相关，且于期望信号不相关。

3 阵列方向图定义

阵列天线的方向图：是按一定方式排列的天线阵列的权矢量对来自空间不同方向的信号的阵列响应。则阵列的方向函数可以表示为

$$F(\theta)= W^H a(\theta) \tag{1}$$

式中W为波束合成算法得出的权矢量。

方向函数表征了波束合成后，天线对各个方向来的信号的增益。对上式进行取绝对值并归一化，然后取对数处理后，阵列的方向图可以表示为

$$P(\theta)=20\log_{10}\left\{\frac{|F(\theta)|}{\max|F(\theta)|}\right\} \tag{2}$$

由(1)和（2）式可以得出，当阵列的权矢量改变时，对来自不同方向的空间信号来说,就会有不同的响应，从而形成的阵列方向图 $P(\theta)$ 的指向就会改变。

4 数字波束合成算法

数字波束合成算法是通过对阵列不同位置的阵元进行加权，来使阵列方向图的主瓣对准期望信号入射方向，低旁瓣对准干扰方向，以此达到增强期望信号、抑制干扰的目的，其包括常规数字波束合成算法以及自适应数字波束合成算法。

4.1 常规数字波束合成算法

常规数字波束合成算法的权值是固定的,与输入信号无关。权值等于期望信号的导向矢量。因此在期望信号方向的响应为 $F(\theta_0)= a(\theta_0)^H a(\theta_0)=N$；其中 θ_0 为期望信号入射角，N为阵元个数。这时，各通道的信号同相相加，阵列在期望信号 θ_0 方向的信号增益最大。

4.2 自适应数字波束合成算法

自适应数字波束合成算法是根据信号的先验知识和一定准则，调节阵列的权矢量，使天线阵列方向图在期望方向形成主波束，而在干扰方向形成零陷，从而对干扰形成抑制。自适应波束合成权值是与输入信号有关的，且随着电磁环境的变化而自适应的调整，能够实现对期望信号的跟踪[4-5]。自适应波束合成系统框图如图5所示。

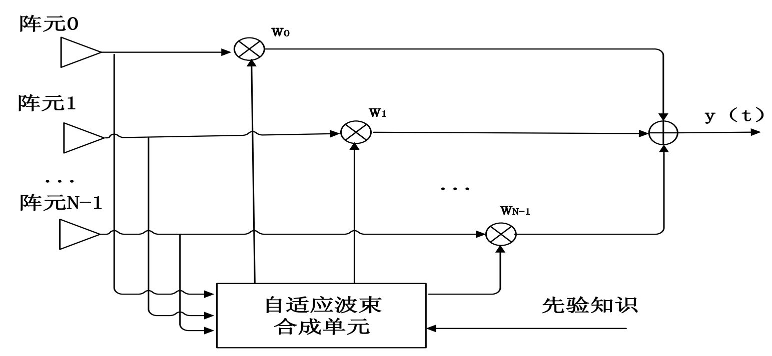


图5 自适应波束合成系统框图

Fig.5 Block diagram of adaptive beamforming system

LCMV 算法是一种较优的自适应数字波束合成算法，LCMV 算法原理是在控制期望信号方向的增益为 1，干扰方向的增益为 0 的前提下，使阵列输出功率最小[6]。其约束表达式为

$$C^H W = f \qquad (3)$$

式中 $C=[a(\theta_0),a(\theta_1)]$ 为 N×2 维约束矩阵，θ_0 为期望信号方向，θ_1 为干扰信号方向，$f=[1,0]^T$ 为 2×1 维响应矩阵。

LCMV 算法的数学表达为

$$min(W^H R_x W) \qquad (4)$$

$$s.t\ C^H W = f \qquad (5)$$

式中 R_x 为接收信号(期望信号、干扰和噪声)的协方差矩阵。

利用拉格朗日乘子法解得最优权矢量为

$$W_{opt} = R_x^{-1} C\left[C^H R_x^{-1} C\right]^{-1} f \qquad (6)$$

由于系统幅相误差的存在，会使接收到的信号的协方差矩阵 R_x 和实际信号的协方差矩阵 R_x 存在差异，算法的性能也会因此下降。R_x 的误差也就是期望信号的误差和干扰的误差，为了减少误差的影响，对 R_x 做一个预处理，我们知道 LCMV 算法是在期望信号响应为 1 的情况下，让期望信号、干扰、噪声的功率最小，也就是让干扰和噪声的功率最小。所以，在 R_x 中减去期望信号的成分。

$$X_{\mathrm{i+n}} = X_{\mathrm{x}} - X_{\mathrm{s}} \qquad (7)$$

$$R_{\mathrm{i+n}} = E(X_{\mathrm{i+n}} X_{i+n}^H) \qquad (8)$$

式中 X_{x} 为接收到的信号(期望信号、干扰和噪声)，X_{s} 为接收到的期望信号，$X_{\mathrm{i+n}}$ 为接收到的干扰加噪声。$R_{\mathrm{i+n}}$ 为仅含干扰加噪声的协方差矩阵。那么最优权矢量变为

$$W_{opt0} = R_{i+n}^{-1} C\left[C^H R_{\mathrm{i+n}}^{-1} C\right]^{-1} f \qquad (9)$$

这样接收到的信号的协方差矩阵 R_x 和实际信号的协方差矩阵 R_x 的误差就是接收到的干扰和实际的干扰之间的误差。

4. 3 Matlab实验仿真与结果分析

对于IPS望远镜主站的抛物柱面天线，其单个柱面天线包含304个馈源，馈源间距为半波长。在IPS观测中，需要对所有馈源的信号进行波束合成处理，来实现天线指向不同的射电源。这里可以将所有这些馈源视为一个馈源线阵，阵元个数N=304个，阵元间距d=0.5λ。为了评估数字波束合成算法的性能，我们进行了如下仿真：

(1) 假定期望信号到达角为10度。常规数字波束合成算法下的阵列方向图如图6所示。

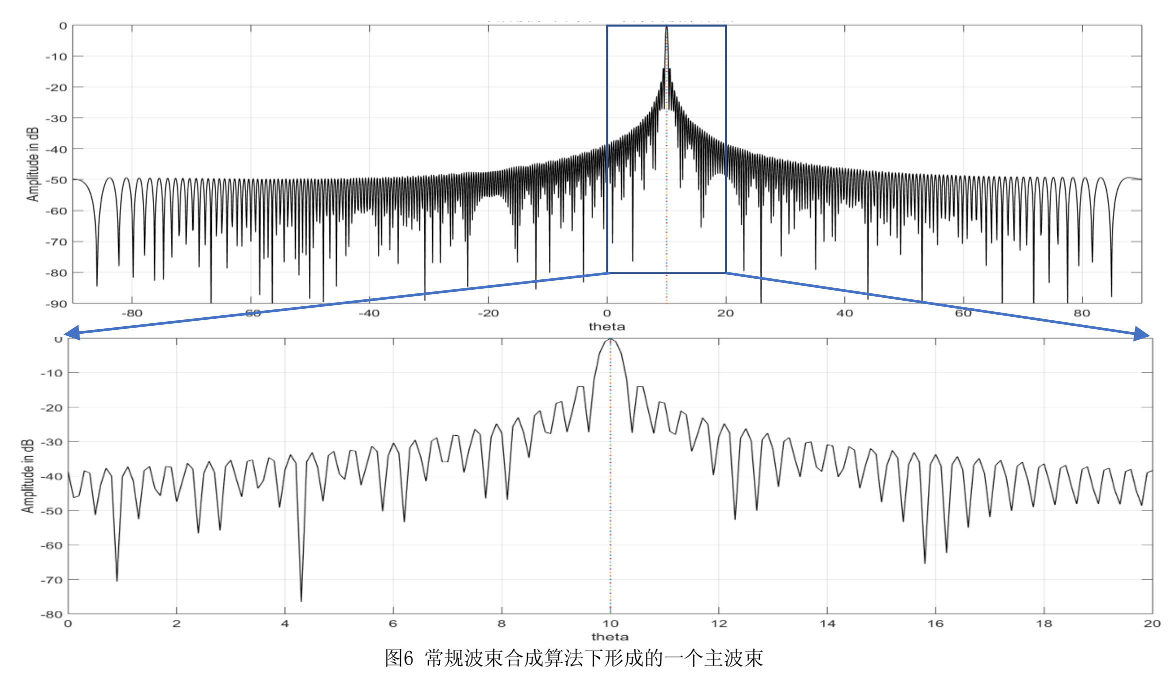
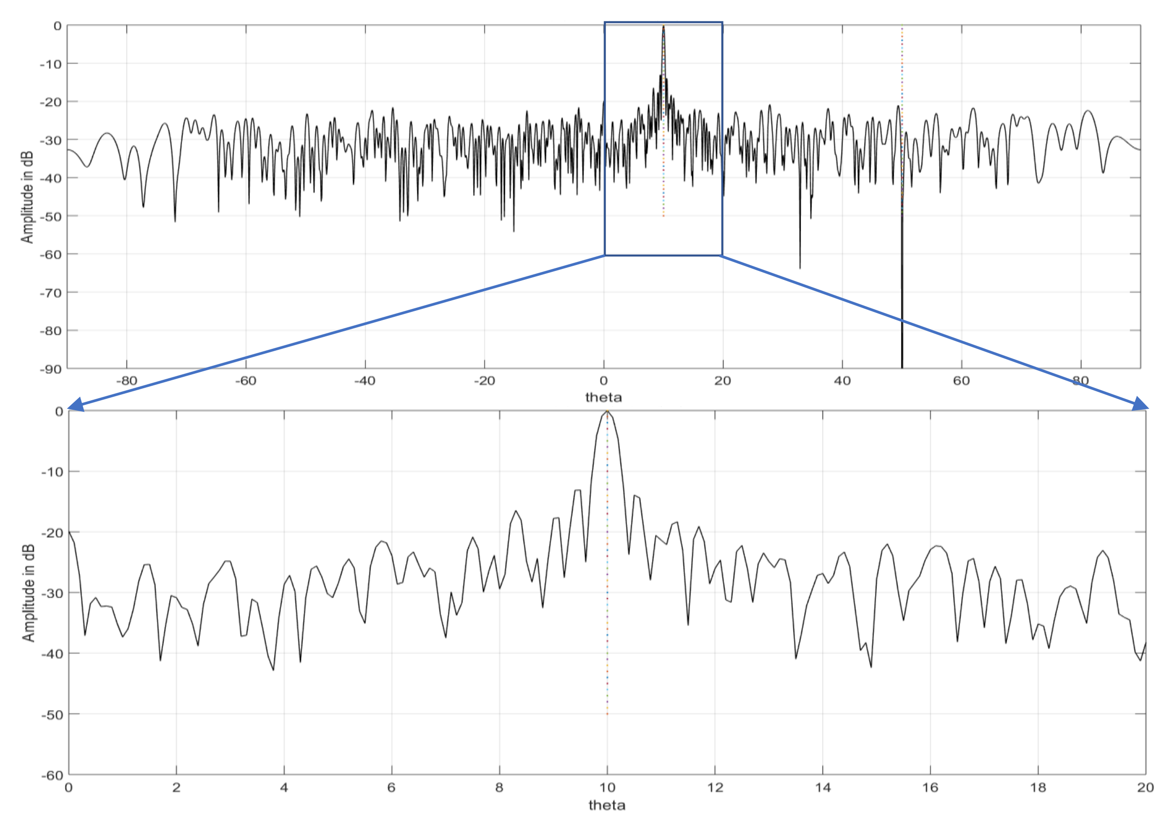


图6 常规波束合成算法下形成的一个主波束

Fig.6 A main beam formed by conventional beamforming algorithms

(2) 期望信号到达角为10度，干扰信号到达角为50度，快拍数为1000，SNR=30dB, INR=30dB，



干扰加上5%的幅相误差。基于LCMV算法下的阵列方向图如图7所示。

图7 LCMV算法下形成的一个主波束

Fig.7 A main beam formed by LCMV algorithms

仿真结果显示LCMV算法可以抑制干扰，而常规波束合成算法不能抑制干扰。两种算法阵列方向图的第一旁瓣都较高，达到-13.4dB左右，不满足IPS望远镜数字波束合成旁瓣-20dB的技术指标要求（表1）。在观测中，干扰有可能从较高的旁瓣进入接收系统，影响观测结果。

5 改进的数字多波束合成算法

常规波束合成算法可以通过加窗的方法降低旁瓣以达到IPS望远镜技术指标[7]，但加窗的方法损失了天线的灵敏度。本文在LCMV算法的基础上提出了一种改进算法，在不损失天线灵敏度的情况下降低旁瓣，以满足IPS望远镜技术指标的要求。

5.1 改进的LCMV算法

由LCMV算法可知，其可以在干扰信号方向形成深零陷。为此，采用设置虚拟干扰方法使旁瓣降低。在LCMV算法结果上，寻找高于某个值(比如-25dB)旁瓣峰值所在的角度，并将其设置为虚拟干扰信号方向。LCMV算法是让干扰信号的响应为0，即虚拟干扰方向深零陷，但这必会使其他方向位置有较大升高。所以，改进算法让虚拟干扰响应不为0，而为一个很小的数（比如0.05），这样即可以让虚拟干扰方向的旁瓣高度降低，也不会让虚拟干扰附近的部分旁瓣高度有较大升高。那么改进的LCMV算法的约束表达式可以表示为

$$C_1^{\ H} W_1 = f_1 \tag{10}$$

式中 $C_1 = [a(\theta_0), a(\theta_1), \ldots, a(\theta_m)]$ 为 N×(m+1)维约束矩阵， θ_0 位期望信号方向， θ_1 为干扰信号方向， $\theta_2 \ldots \theta_m$ 为虚拟干扰方向。 $f_1 = [1, 0, 0.05, \ldots, 0.05]^T$ 为(m+1)×1 维响应矩阵。

改进的 LCMV 算法的数学表示为

$$min(W_1^{\ H} R_x W_1) \tag{11}$$

$$s.t\ C_1^{\ H} W_1 = f \tag{12}$$

利用拉格朗日乘子法解得最优权矢量为

$$W_{opt1} = R_x^{-1} C_1 \left[C_1^{\ H} R_x^{-1} C_1 \right]^{-1} f_1 \tag{13}$$

5.2 Matlab 实验仿真与结果分析

在同样的条件下，假定期望信号到达角为10度，干扰信号到达角为50度。快拍数为1000，SNR=30dB, INR=30dB，干扰加上5%的幅相误差。将高于-25db的角度设置为虚拟干扰方向。采用改进的LCMV算法，仿真结果如图8所示。

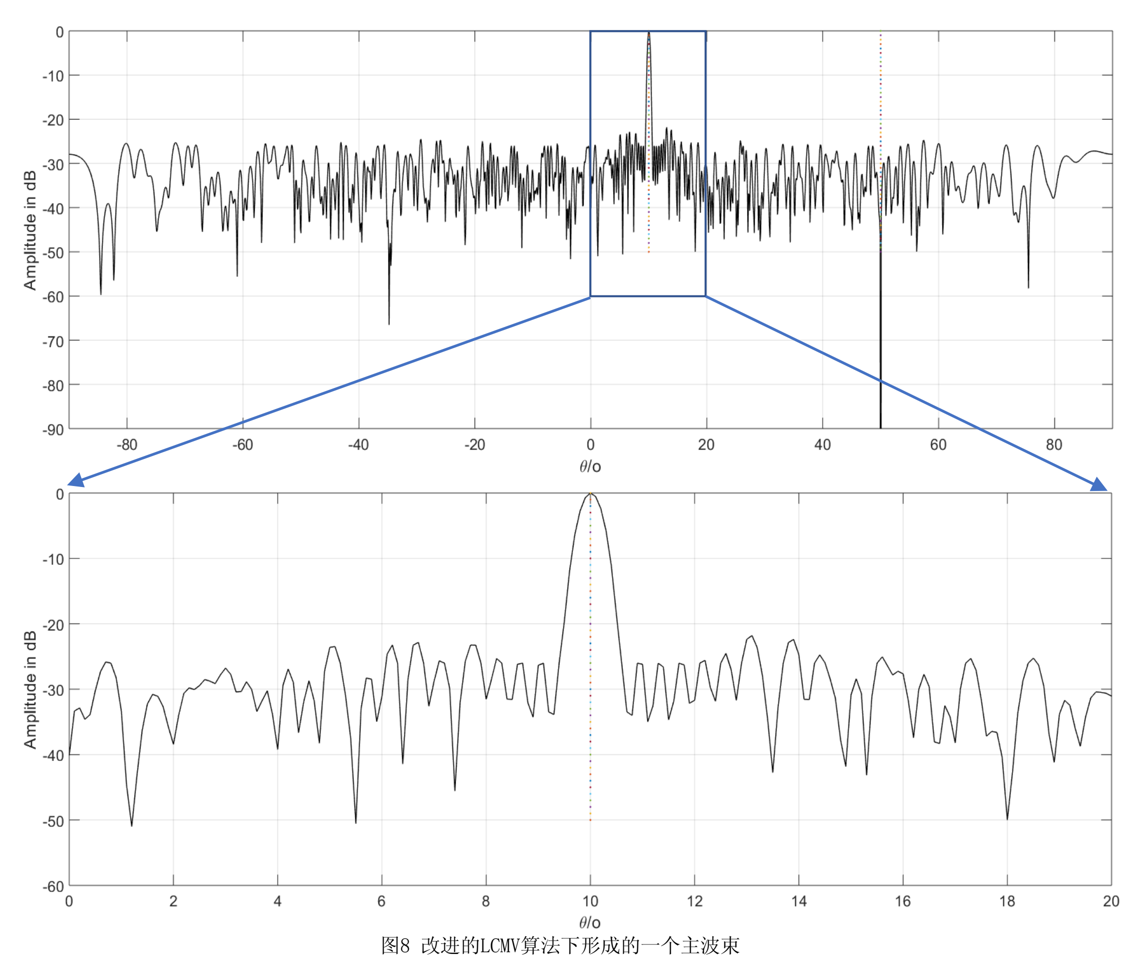


图8 改进的LCMV算法下形成的一个主波束

Fig.8 A main beam formed by improved LCMV algorithms

仿真采用了改进的LCMV算法，将LCMV算法下的阵列方向图中高于-25dB的角度设置为虚拟干扰方向，并让其响应为0.05。仿真结果可以看到阵列方向图主瓣附近的高于-25dB的旁瓣高度降低至-25dB以下。由于增加了虚拟干扰方向响应的约束条件，虚拟干扰方向附近的部分旁瓣的幅度有小幅度的增加，使其超过-25dB，但没有超过-20 dB。因此，改进后的LCMV算法达到了IPS望远镜的技术指标(-20dB)要求。

6 基于子阵的改进数字波束合成算法

如果对阵列的每个阵元都对应一个接收通道，这时阵列的响应最好，阵列控制波束指向的灵活度也最高。但是，对于本文这种大型阵列权矢量的维度就会很高，进而数字波束合成算法的复杂度就会很高，同时每个接收通道都需要连接AD转换器、滤波器等硬件资源，系统非常复杂，硬件成本也很高。于是希望尽可能保持良好的阵列响应前提下，通过减少通道数的方式来降低系统复杂度和硬件成本。减少通道数是采用子阵化方法实现的，每个子阵对应一个接收通道[8]。因此，下面提出基于子阵的数字波束合成算法。基于子阵的数字多波束合成算法原理框图如图9所示。

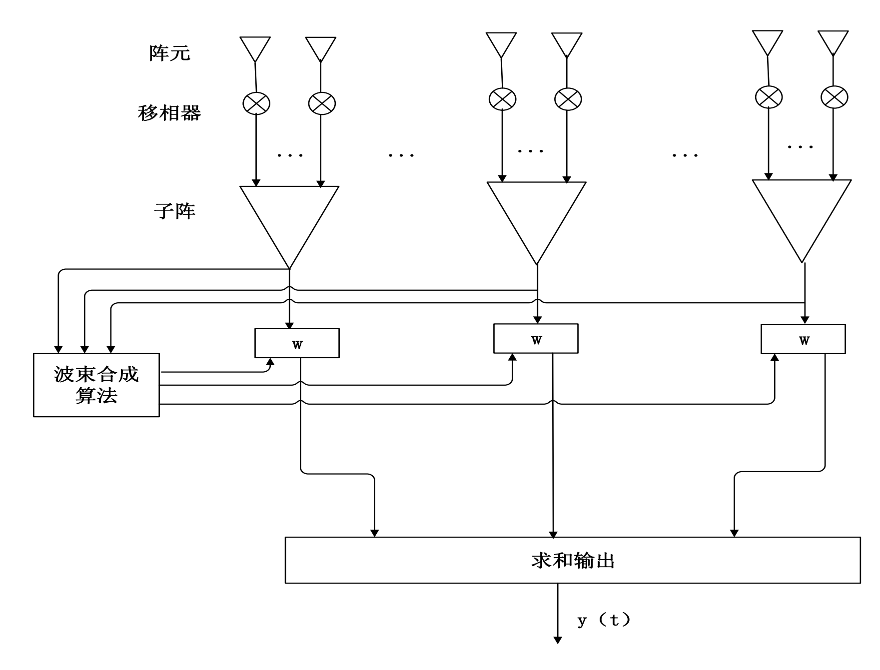


图9 基于子阵的数字多波束合成算法原理框图

Fig.9 Principle Block diagram of digital multi-beam beamforming algorithm based on subarray

表2 阵元级和子阵级复杂度对比

	原始阵列	子阵方案I（4个阵元）	子阵方案II（8个阵元）
阵列单元数	304	76	38
模拟移相器	0	76×3	38×7
AD转换器	304	76	38
数据速率	304×100MB	76×100MB	38×100MB
权矢量维度	304×1	76×1	38×1

Tab.2 Comparisons of complexity at element level and subarray Level

上表是阵元级和子阵级复杂度对比，可以看到采用基于子阵的数字波束合成算法，除了子阵内阵元之间需要加多个模拟移相器外，在AD转换器个数、数据速率、权矢量维度都以单个子阵内阵元个数成倍的降低。单个子阵内的阵元数目越多，AD转换器个数、数据速率、权矢量维度降低的越多，但是阵列控制波束的灵活度又有所降低。所以为了保持良好的阵列响应，不能一味的增加子阵内阵元的个数。

6.1 Matlab实验仿真与结果分析

（1）对于由304个阵元构成的线阵，假定子阵阵元数分别为19、38，子阵间无重叠，期望信号到达角为10度，干扰到达角为50度。快拍数为1000，SNR=30dB, INR=30dB，干扰加上5%的幅相误差。将高于-25dB的角度设置为虚拟干扰方向。阵元之间采用移相器，使同一子阵内阵元相位为同相。子阵之间选用改进的LCMV算法。对子阵内不同阵元数分别进行仿真，仿真结果如图10、11所示。

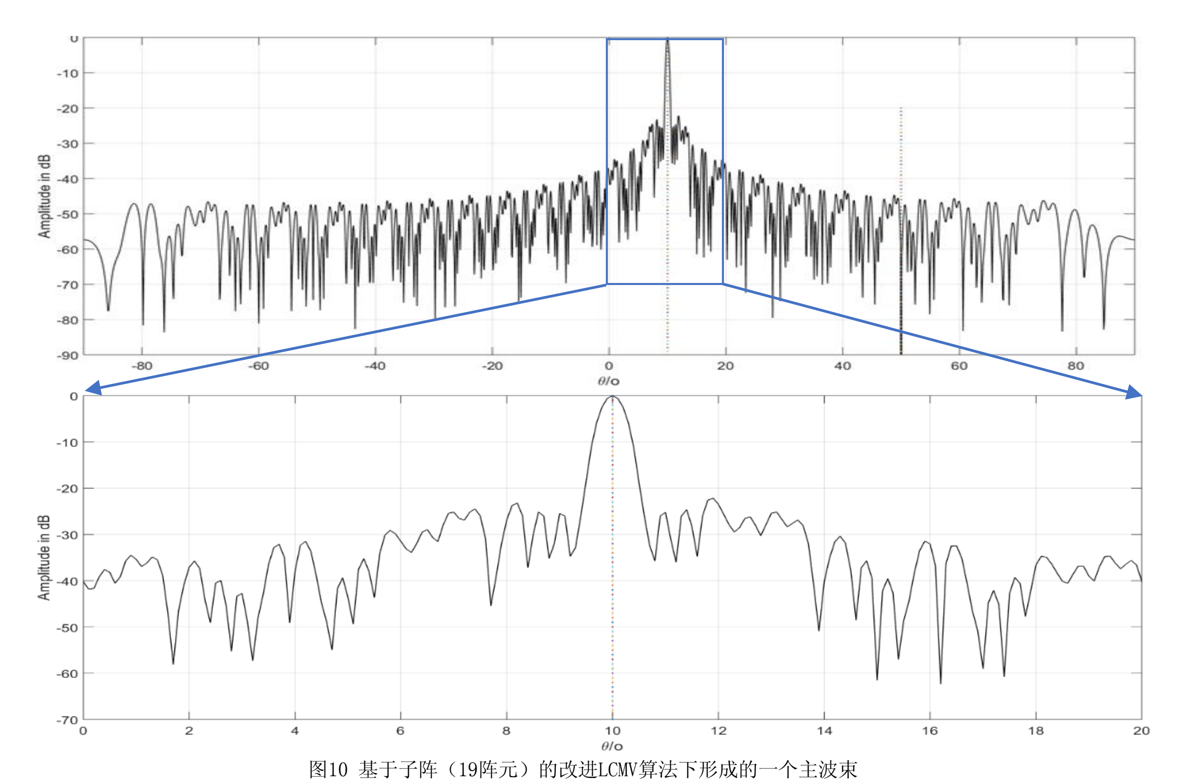


图10 基于子阵（19阵元）的改进LCMV算法下形成的一个主波束

Fig.10 A main beam formed by improved LCMV algorithm based on subarray (19 elements)

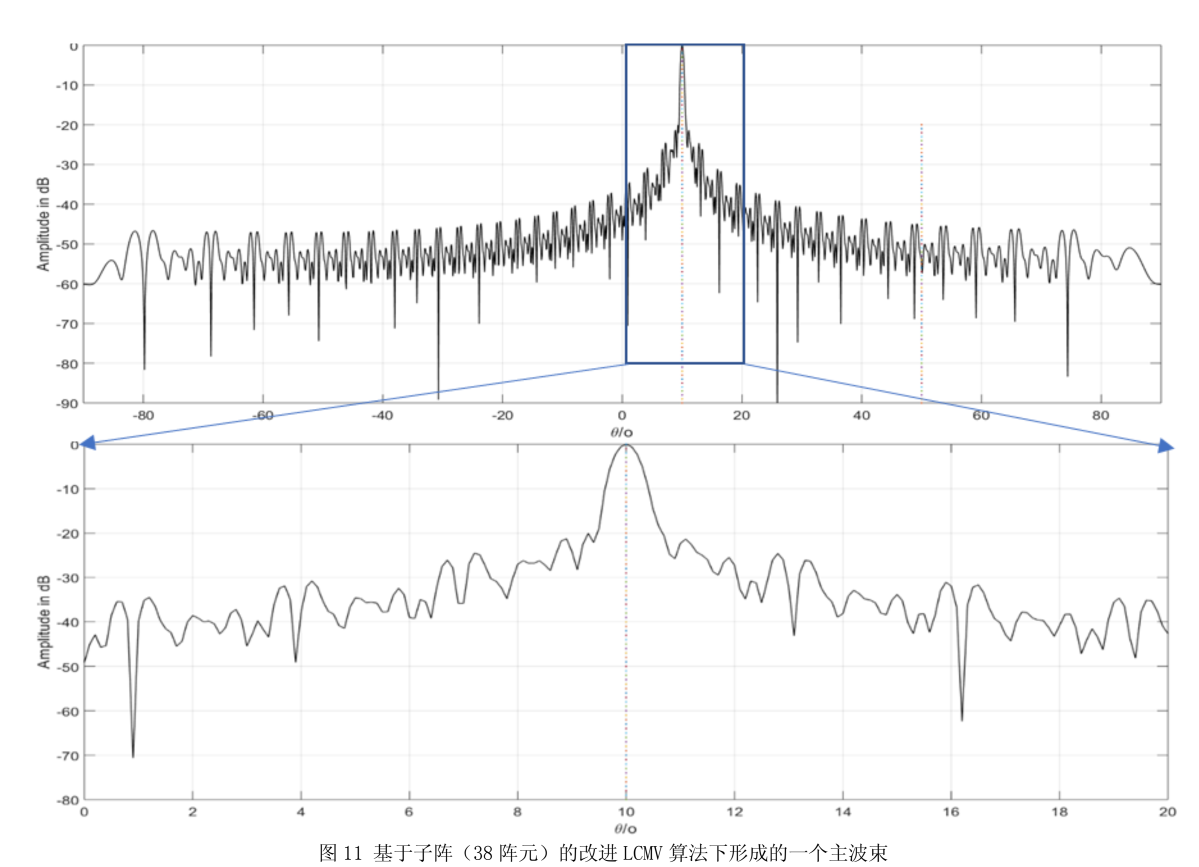


图 11 基于子阵（38 阵元）的改进 LCMV 算法下形成的一个主波束

Fig.11 A main beam formed by improved LCMV algorithm based on subarray (38 elements)

仿真结果显示基于子阵（单个子阵内19阵元和38阵元）的改进LCMV算法都满足了IPS望远镜的旁瓣指标要求，算法的复杂度相比阵元级数字波束合成算法也大大降低。但是，以38个阵元为一个子阵的波束合成算法在干扰方向并没有形成深零陷，且第一旁瓣的幅度比较高，算法的性能明显降低。还对基于子阵(子阵阵元数分别为2、4、8、16)的改进LCMV算法进行了仿真，仿真结果也都满足了IPS望远镜的旁瓣指标要求。而且，随着单个子阵阵元数的增加，算法性能会越来越低。因此在可以整除304的数字中，19为最大的单个子阵阵元数。

7 多波束合成

前面主要讨论了单个波束的合成，而我们需要同时对多个射电源进行观测，就需要形成多个主波束。要形成多个主波束，根据我们前面所述的波束合成原理可知，阵列的权值决定了阵列方向图主波束的波束指向。因此，就需要产生多组不同的权值。每组权值对应不同的相位补偿和幅度调整值，从而形成多个主波束[9-10]。合成多波束的原理框图如图12所示。

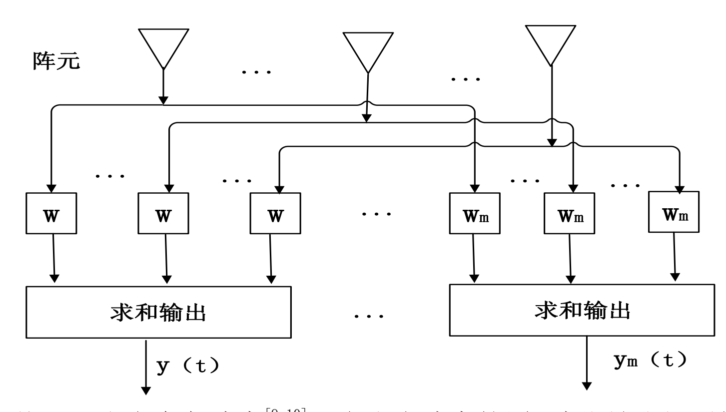


图12 多波束合成的原理框图

Fig.12 Principle block diagram of multi-beam beamforming

7.1 Matlab实验仿真与结果分析

（1）仿真条件：阵元个数N=304个，阵元间距d=0.5λ，19个阵元为一个子阵无重叠，多个期望信号到达角为分别为-20度、0度、10度、30度，干扰信号到达角为50度。快拍数为1000，SNR=30dB，INR=30dB，干扰加上5%的幅相误差。将高于-25db的角度设置为虚拟干扰方向。阵元之间采用移相器，使同一子阵内阵元相位为同相，子阵之间选用改进的LCMV算法。仿真结果如图13所示。

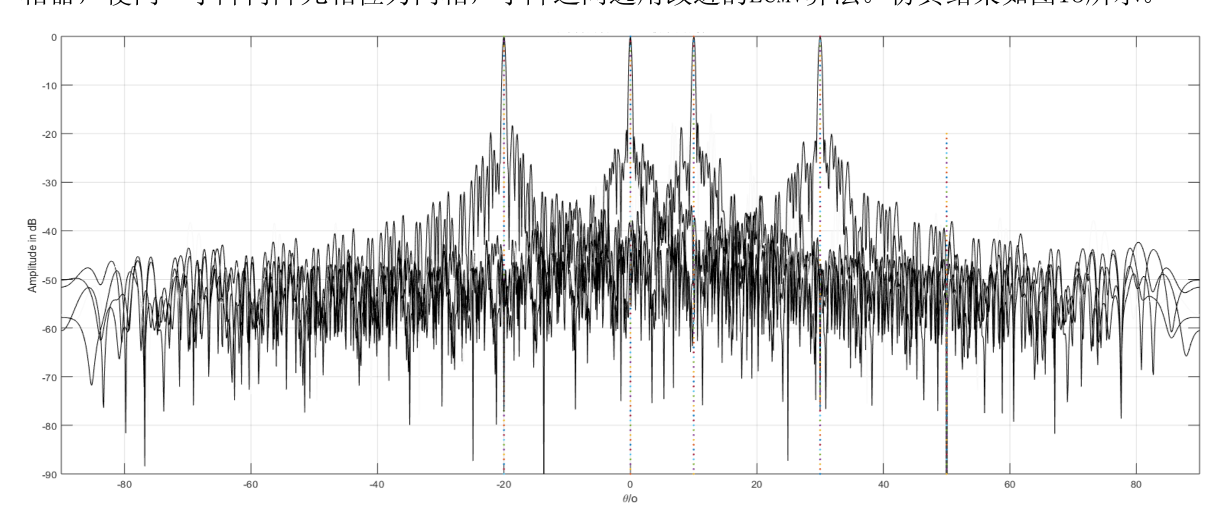


图13 基于子阵（19阵元）的改进LCMV算法下形成的4个主波束
Fig.13 Four main beams formed by improved LCMV algorithm based on sub-array (19 elements)

由上图可知，在-20度、0度、10度、30度4个方向形成了主波束，且旁瓣也基本达到了IPS望远镜技术指标。

8 总结

本文对子午二期IPS望远镜的关键技术—数字波束合成技术进行了研究，提出了一种适应于IPS望远镜的柱面天线的数字波束合成算法。该算法在LCMV算法的基础上利用设置虚拟干扰的方法获得了满足了IPS望远镜的合成波束。同时，采用子阵化的方法降低了系统数字波束合成算法的复杂度，进而降低了工程实现难度。最后，在单个波束的基础上，提出了多波束合成的算法，实现对天空多个射电源同时进行观测。

参考文献：

[1]刘丽佳,彭勃.行星际闪烁单站单频数据处理[J].天文研究与技术,2010,7(01):21-26.
[2]李沙，颜毅华，王威, et al. 行星际闪烁望远镜选址电，磁环境测试[J]. 中国无线电, 2017(7):36-38.
[3]宋飞. 数字波束形成技术综述[J]. 科学与财富, 2016(10).
[4]隋莉莉. 自适应波束形成及在多信号识别中的应用[D]. 2014.
[5]白登潘. 自适应数字波束形成以及稳健技术研究[D].陕西:西安电子科技大学,2014.
[6]宋凯歌. 低旁瓣数字波束形成算法研究[D]. 电子科技大学.
[7]R. C. de Lamare, L. Wang, R. Fa. Adaptive Reduced-Rank LCMV Beamforming Algorithms Based on Joint Iterative Optimization of Filters: Design and Analysis,Signal Processing, 2010, Vol.90(2), pp.640-652.
[8]李艳艳. 基于幅度加权的面阵波束指向性研究[D]. 西北大学, 2010.
[9]詹德志,金乘进,于金龙,甘恒谦,朱凯,刘鸿飞.FAST L波段多波束馈源设计的初步分析[J].天文研究与技术,2010,7(04):295-302.
[10]邓金花. 阵天线同时多波束原理与方法研究[D]. 2016.

Research on Digital Beamforming Technology for Interplanetary Scintillation (IPS) Telescope

Yang xuan[1,2], Chen Linjie[2], Rong Jian[1], Yan Yihua[2,3]
(1 University of Electronic Science and Technology of China, Sichuan Chengdu 610066;
2 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101
3. University of Chinese Academy of Science, Beijing, 100049)

Abstract: For the Mingantu interplanetary scintillation telescope of the Meridian II project, the digital beamforming technology is one of the key technologies. Since the present digital beamforming algorithms cannot match the requirements of the interplanetary scintillation telescope, In this paper, the existing digital beamforming algorithm - LCMV algorithm is improved and optimized. The method of setting virtual interference is used to reduce the sidelobe of array pattern and the method of subarray is used to reduce the complexity of the algorithm. The improved LCMV algorithm is a digital beamforming algorithm suitable for Mingantu interplanetary scintillation telescope. The simulation results show that the algorithm can meet the needs of IPS telescope very well. Meanwhile, based on the single beam algorithm, an algorithm of multi-beamforming has also been proposed and discussed.

Key words: Interplanetary scintillation (IPS) telescope, Digital beamforming algorithm, Linear Constrained Minimum Variance (LCMV)